

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
Ústav pro životní prostředí

Studijní program: Ekologie a ochrana prostředí

Studijní obor: Ochrana životního prostředí



**Koncentrace supermikronových a submikronových
aerosolových částic ve vnitřním prostředí základní školy v
Praze**

Concentrations of indoor submicrometer and supermicrometer
particulate matter in a primary school in Prague.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zpracovatel: Jitka Štolcpartová

Školitel: prof. RNDr. Martin Braniš, CSc.

Datum: Srpen 2012

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a informací, na něž odkazuji. Svoluji k jejímu zapůjčení s tím, že veškeré (i přejaté) informace budou řádně citovány. Rovněž prohlašuji, že předložená diplomová práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

V Praze dne

Jitka Štolcpartová

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce, prof. RNDr. Martinovi Branišovi, CSc., za jeho profesionální a trpělivé vedení, praktickou pomoc, cenné rady a připomínky. Jirkovi Hromádkovi děkuji za skvělou spolupráci při praktické práci na projektu.

Velké poděkování patří rovněž vedení školy, školníkovi, učitelům a žákům, za vstřícný přístup a toleranci v průběhu monitoringu.

V neposlední řadě děkuji své rodině a všem blízkým za podporu během celého studia.

Abstrakt

Děti jsou skupinou, která je citlivá ke znečištěnému prostředí v jejich okolí. Prostor, v němž tráví nejdelší část dne, je domov, hned druhým je však škola. Vnitřní prostředí ve škole tedy ovlivňuje jejich zdraví, pohodu a dokonce může mít vliv i na jejich prospěch.

Předkládaná práce sledovala koncentrace vzdušného polutantu, aerosolových částic, v oborových třídách (počítačová učebna, výtvarná výchova a biologie/chemie) v základní škole v centru Prahy. K měření částic byly využity přístroje s kontinuálním zapisováním průměrných hodnot měřící hmotnostní koncentraci 4 frakcí aerosolových částic (PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_4 a PM_{10}) a četnostní koncentraci submikronových částic. Měření probíhalo po 4 dny v každém měsíci od listopadu 2011 do července 2012.

Bylo zjištěno, že hmotnostní koncentrace submikronových částic byly závislé na venkovních koncentracích na rozdíl od supermikronových, které ovlivňovaly žáci svojí fyzickou aktivitou a venkovní koncentrace měla minimální vliv. Zvýšená četnostní koncentrace submikronových částic byla pozorována pouze za přítomnosti žáků, kterou pravděpodobně způsobila jejich aktivita při vyučovacích hodinách. Hmotnostní koncentraci ovlivňovalo i roční období, kdy v jarním/podzimním byly naměřeny nejvyšší vnitřní i venkovní koncentrace. Umístění učebny mělo vliv na hmotnostní koncentraci submikronových částic.

Děti byly přítomny ve školách v době, kdy zde také byly nejvyšší jak hmotnostní tak i četnostní koncentrace aerosolových částic. Budoucí práce by se měly zaměřit na identifikaci těchto zdrojů a jejich minimalizaci.

Klíčová slova:

Školy, vnitřní prostředí, děti, submikronové částice, supermikronové částice, poměr I/O

Abstract

Children are a susceptible group to environment pollution. The environment, in which they spend the most time, is the home, the second is the school. Therefore, the indoor environment of a school affects their health, wellbeing and even school results.

The present work investigated concentrations of air pollutant, aerosol particles, in the specialized classrooms (computer lab, arts and biology/chemistry) in an elementary school, Prague. Direct reading instruments measuring mass concentration of four aerosol fractions and number concentration of submicrometer particles were used for measurement. Measurements were carried out for four weekdays in each month from November 2011 to July 2012.

It was found that mass concentrations of submicrometer particles were dependent on outdoor concentrations, in contrast to supermicrometer particles which were affected mainly by physical activities of students and outdoor concentration had a minimal effect. Increased number concentrations of submicrometer particles were observed only during children presence, concentrations were probably induced by student activities during lessons. Seasons also influenced mass concentrations, when the highest indoor and outdoor concentrations were recorded in a spring/autumn season. Classroom location affected submicrometer particles mass concentrations.

Children were present in school at the time, when there were the highest mass and number concentrations of particulate matter. Future works should be focused on identification of aerosol sources and their minimisation.

Key words:

Schools, indoor environment, children, submicrometer particles, supermicrometer particles, I/O ratio

Obsah

Abstrakt	4
Obsah.....	6
Úvod	7
Cíle práce	12
Metodika.....	13
Lokalita	13
Přístroje a metodika odběru.....	14
Obsazenost a ventilace v učebnách	16
Ventilační rychlost.....	16
Zpracování dat.....	17
Statistické zpracování dat.....	18
Výsledky.....	19
Výměna vzduchu ve třídách	19
Vztah vnitřní a venkovní koncentrace aerosolových částic.....	19
Vliv typu učebny a sezóny na hmotnostní koncentraci aerosolu.....	22
Vliv přítomnosti žáků a ventilace na koncentrace aerosolu	26
Diskuse	33
Závěr	38
Zdroje	39
Příloha A.....	44

Úvod

Z mnoha epidemiologických studií vyplývá, že znečištění ovzduší negativně ovlivňuje lidské zdraví a jako jeden z hlavních environmentálních problémů přímo působí na kvalitu a délku lidského života (WHO, 2011). Z těchto důvodů se touto problematikou po právu zabývá mnoho badatelů i institucí po celém světě. Jelikož lidé tráví většinu života v budovách (Hoppe *et* Martinac, 1998), pozornost se nyní čím dál více zaměřuje na ovzduší vnitřní. Je zřejmé, kvalita vnitřního ovzduší je stejně nebo dokonce více důležitá než ovzduší venkovní.

Kvalitu vnitřního ovzduší určuje jak množství znečišťujících látek, tak i mikroklimatické podmínky (teplota, vlhkost, oxid uhličitý), které mohou snížit efektivitu práce, soustředění či lidskou pohodu (Paevere *et* Brown, 2009). Tyto vlastnosti dělají z kvality vnitřního prostředí velmi důležitý element v prostředí pracovním, zejména v zaměstnáních vyžadujících soustředění a kreativní přístup k řešení daných úkolů. Tyto požadavky jsou ale také kladeny na děti ve školách.

Škola představuje pro děti prostředí, v němž tráví hned po domově nejdelší část dne (Silvers *et al.*, 1994). Špatná kvalita vnitřního prostředí ve školách nejen zvyšuje nemocnost žáků, snižuje koncentraci a schopnost učit se, ale také prostřednictvím nemocnosti zvyšuje absence, což vede ke ztížení studia samotného (Mendell *et* Heath, 2005). Jedním z klíčových polutantů vnitřního prostředí jsou aerosolové částice, přičemž jemné frakce jsou považovány za nebezpečnější pro lidský organismus. Expozice dětí tomuto polutantu je průměrně vyšší během pracovních dnů, což je zapříčiněno právě pobytem ve škole (Ashmore *et* Dimitroulopoulou, 2009).

Aerosol se do tříd dostává zvenku skrz průduchy, škvíry či otevřená okna nebo může být vytvářen přímo v místnosti. Také resuspenze, navrácení již usazených částic do vzduchu, má významný dopad na koncentraci částic ve vnitřním prostředí. Nejvíce podléhají resuspenzi částice v rozmezí aerodynamického průměru 5-25 μ m, kdy např. chůze po pokoji může zvýšit koncentraci těchto částic i o 100%. Se snižující velikostí částic se účinnost resuspenze snižuje (Thatcher *et* Layton, 1995; Shaughnessy *et* Vu, 2012). Částice s aerodynamickým průměrem pod 1 μ m (PM₁) téměř resuspenzi

nepodléhají a resuspenze tak nepředstavuje významný zdroj těchto částic (Thatcher *et al.*, 1995; Ould-Dada *et al.*, 2001; Ferro *et al.*, 2004). Submikronové částice v ovzduší byly tedy přímo vypuštěny do ovzduší nebo se sekundárně vytvořily ve vzduchu z plynných prekurzorů.

Rychlost výměny vzduchu v místnosti má zásadní vliv na koncentrace plynných polutantů ve školních třídách (Poupard *et al.*, 2005). Zjednodušeně se dá říci, že čím vyšší přirozená výměna vzduchu (nenucená ventilace), tím se k sobě vnitřní a venkovní koncentrace přibližují. Pokud tedy jsou otevřená okna a dveře, koncentrace plynných polutantů uvnitř jsou podobné koncentraci venkovní. U aerosolových částic vstupuje do vztahu navíc velikost částic, přičemž menší částice penetrují přes obálku budov lépe, částice než větší (Tippayawong *et al.*, 2009). Tento vztah neplatí absolutně, ultra jemné částice ($PM_{0,1}$) penetrují hůře než částice o něco větší ($PM_{0,1-2,5}$) kvůli difúzním ztrátám. Vztah koncentrací uvnitř třídy a venku (I/O) by se měl přibližovat hodnotě 1 s vyšší rychlostí výměny vzduchu a s menší velikostí částice. Bylo shledáno, že submikronové částice mají stabilnější I/O (blíží se hodnotě hodnotě) 1 než supermikronové (Blondeau *et al.*, 2004; Poupard *et al.*, 2005; Tippayawong *et al.*, 2009). Menší částice jsou tedy spíše venkovního původu, než vnitřního (Avigo *et al.*, 2008; Diapouli *et al.*, 2008; Branis *et al.*, 2009). Avšak do vztahu I/O vstupuje mnoho proměnných, jako jsou vnitřní zdroje znečištění, povětrnostní podmínky (Chan, 2002; Branis *et al.*, 2005), a tak mohou být naměřeny i hodnoty v rozporu s řečenými premisami jako např. v I/O počtu částic 0,62 při zavřených oknech ve třídě a nižší hodnota 0,56 při otevřených (Guo *et al.*, 2008).

Koncentrace částic ve třídách ovlivňuje také období, kdy data byla nasbírána. Pro zimním období, nízké teploty a vyšší relativní vlhkost, jsou typické vyšší jak vnitřní, tak i venkovní koncentrace aerosolových částic oproti letnímu období (Fromme *et al.*, 2007; Branis *et al.*, 2009). Období ovlivňuje i aktivity během vyučovacích hodin a tak zprostředkovaně mění podmínky ve třídách. Crist *et al.* (2008) prokázali v zimním období korelaci mezi hmotnostní koncentrací PM_{10} i $PM_{2,5}$ s velikostí třídy a počtem přítomných žáků, v létě nikoli. Jako možné vysvětlení se naskytá zvýšená ventilace (otevřená okna) během letního období. Zvýšená ventilace a aktivita žáků pravděpodobně také zapříčinily výsledek, kdy byly naměřeny vyšší hmotnostní koncentrace aerosolových částic v letní a jarní sezóně. Tyto zdánlivě protikladné

výsledky vlivu sezóny na koncentrace aerosolových částic demonstrují složitost problematiky vnitřního prostředí učeben, jelikož koncentrace v každé učebně je závislá na venkovní koncentraci, aktivitě a množství studentů a intenzitě ventilace. Rozdíly mezi létem a zimou byly také doloženy pro četnostní koncentraci (Diapouli *et al.*, 2007).

Na koncentrace částic mají zásadní dopad činnosti probíhající během školního dne, to je jasně dokládáno krátkodobými epizodami, kdy se koncentrace aerosolu pod vlivem nějakého intenzivního zdroje rychle zvýší (Blondeau *et al.*, 2004; Morawska *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2012). Podle těchto epizod či jiných ukazatelů (chemické složení) byly identifikovány činnosti, které významně přispívají k úrovni koncentrací aerosolových částic ve třídách škol. V mnohých případech je hlavní zdroj znečištění aerosolovými částicemi přítomen ve třídě (Diapouli *et al.*, 2008; Fromme *et al.*, 2008).

Významnou roli v množství aerosolových částic v učebnách hraje též údržba. Úklid významně snižuje množství aerosolových částic ve třídě následující den po úklidu. Odstraní se totiž částice, které by mohly být aktivitou žáků resuspendovány (Heudorf *et al.*, 2009). Tento pokles se odrazí v supermikronových částicích, které mohou resuspendovat. Avšak čištění samotné může naopak přispět ke vzniku submikronových částic (Morawska *et al.*, 2009, Zhang *et al.*, 2012).

Čisticí prostředky obsahují těkavé organické látky (VOCs), které společně s ozónem mohou vytvořit jemné částice. Identifikovaná VOC, která byla uvolňována z čisticích prostředků během úklidu třídy, je limonen. Ten byl zároveň identifikován společně s ozónem jako původce zvýšení četnostní koncentrace jemných částic v ovzduší (Morawska *et al.*, 2009). Jiná studie podala důkaz o negativní korelaci počtu částic a koncentraci ozónu ve školních třídách. Vedle možného účinku zvětšené depoziční plochy pro ozón v důsledku většího počtu částic v ovzduší je další možné vysvětlení právě tvorba nových částic z VOCs a ozónu (Poupard *et al.*, 2005). Limonen je jen jedním z VOCs vyskytujícím se ve vnitřním prostředí, který je spjatý s přítomností lidí. Další VOCs (aceton, isopren, nonanal, decanal, etanol, eukalyptol a α -pinen) spjaté s přítomností lidí, by mohly mít stejné účinky (Burdack-Freitag *et al.*, 2009).

Aktivity v během vyučování také ovlivňují hodnoty aerosolových částic. V průběhu vyučovacích hodin mladších žáků (do 4. třídy) byly naměřeny vyšší hmotnostní

koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$, což bylo nejspíše zapříčiněno vyšší fyzickou aktivitou v hodinách než u starších žáků z vyšších tříd (Fromme *et al.*, 2007). Zvýšené hodnoty hmotnostní koncentrace PM_{10} byly také zjištěny o přestávkách a před začátkem vyučovacích hodin (Heudorf *et al.*, 2009). Fyzické aktivitě v hodinách jsou také připisovány naměřené významně vyšší hodnoty částic s aerodynamickým průměrem větším než $2,5\mu m$ oproti venkovním koncentracím (Blondeau *et al.*, 2004; Branis *et al.*, 2005; Almeida *et al.* 2011). Činnosti, které uvolňují VOCs (např. kreslení a lepení během výtvarné výchovy) nebo přímo generují částice (hořící svíčka) zvyšují počet submikronových částic ve třídách (Morawska *et al.*, 2009, Zhang *et al.* 2012). Obecně se dá říci, že přítomnost dětí ve třídě zvyšuje koncentrace aerosolových částic, ať už jsou příčinou děti samotné (tzv. „personal cloud“) nebo činnosti jimi vykonávané (Crist *et al.*, 2008; Diapouli *et al.*, 2008; Sousa *et al.*, 2012).

Variabilita získaných dat z měření v několika školách může být zkreslena vybranou učebnou/učebnami. Nejstálější koncentrace aerosolových částic v rámci jedné školy mají malé, submikronové částice, kdežto supermikronové se liší více. Variabilita učeben v koncentraci submikronových částic naměřených v 64 školách byla vysvětlena až z 90% lokalitou školy, resp. koncentraci aerosolových částic okolím ovzduší, a 10% rozdíly mezi učebnami v rámci jedné školy (Fromme *et al.*, 2007). Vysoká variabilita supermikronových částic je pravděpodobně zapříčiněna fyzickou aktivitou žáků, tedy resuspenzí (Poupard *et al.*, 2005; Fromme *et al.*, 2007, Heudorf *et al.*, 2009).

Legislativa jak světová, tak i Česká dává přednost vyjadřování koncentrace aerosolových částic v celkové hmotnostní koncentraci částic s aerodynamickým průměrem $10\mu m$ resp. $2,5\mu m$ (PM_{10} resp. $PM_{2,5}$). Mnoho studií ve školním prostředí se pak soustřeďuje právě na hmotnostní koncentraci (Sousa *et al.*, 2012). Supermikronové částice přispívají významně do konečné hodnoty hmoty, kdežto submikronové částice přispívají velmi málo, ačkoliv tvoří přibližně 95% počtu částic jak ve třídách, tak i ve venkovním prostředí (Poupard *et al.*, 2005). To má za následek, že průběh početní a hmotnostní koncentrace si během dne neodpovídají (Aurangojeb, 2011). Hmotnostní koncentrace PM_{10} nemůže být indikátorem počtu

částic v ovzduší, jelikož ty nejjemnější se v ní stěží odrazí, a právě tyto částice ohrožují lidské zdraví více.

Předložená práce se zabývá jak početní tak hmotnostní koncentrací aerosolových částic měřené ve třech třídách v rámci jedné školy situované centru Prahy. Třídy byly vybrány s ohledem ke specifické činnosti v nich probíhající (výtvarná výchova, biologie a chemie, počítačová výuka). V těchto třídách lze očekávat jiné dynamiky koncentrací aerosolových částic nežli v klasických třídách, např. vliv kreslení a lepení žáků při výtvarné výchově a následné zvýšení koncentrace jemných částic díky uvolněným VOCs (zmíněno v textu str. 9). Použití přístrojů s kontinuálním záznamem průměrující koncentrace každých 5 minut společně s dlouhým obdobím měření dovolilo podrobnou analýzu, která nebyla dosud ve školách v ČR provedena.

Cíle práce

- Zjistit kvalitu a variabilitu vybraných parametrů vnitřního prostředí tříd.
Předpokládám, že
 - Koncentrace hrubých částic bude nejméně odpovídat venkovním koncentracím
 - Hmotnostní koncentrace submikronových částic bude významně ovlivňována koncentrací venkovní
 - V chladnějším období budou zvýšené hmotností i četností koncentrace především submikronových částic v okolí školy, to bude mít dopad na koncentrace těchto částic ve třídách
- Vyšetřit vliv proměnných faktorů (ventilace, žáci) na sledované parametry vnitřního prostředí. Očekávám, že
 - Žáci budou mít výrazný vliv na početní a hmotnostní koncentrace sledovaných částic aerosolových částic
 - Zvýšená ventilace bude zvyšovat koncentrace submikronových částic

Metodika

Lokalita

Měření probíhala na základní škole, která je situovaná v centru Prahy. Budova je přes 100 let stará s přirozenou ventilací. Nejbližší zdroje znečištění jsou dvě nedaleké pozemní komunikace, jedna s 10 000 vozidly/pracovní den vzdálená 130m a druhá s 9 000 vozidly/pracovní den vzdálená 240m od budovy (stav k 31.12. 2011; TSK Praha, 2012). Jiné významné zdroje aerosolových částic (např. průmyslová zařízení) nebyly v dané oblasti zjištěny. Všechny učebny ve škole jsou denně vytírány, popř. koberce jsou vysávány.

Měření byla provedena ve 3 učebnách a na venkovním stanovišti. Všechny učebny mají podlahu krytou linoleem a mají srovnatelnou velikost.

- Počítačová učebna (PU)
 - Učebna ve sníženém podlaží
 - 50,7m²
- Výtvarná výchova (VV)
 - Učebna ve 3. patře
 - 57,5m²
- Chemie/Biologie (CB)
 - Učebna ve 3. patře
 - 55,7m²
- Venkovní stanoviště (O)
 - Na střeše budovy – 4. patro

Přístroje a metodika odběru

K měření hmotnostní koncentrace byly použity nefelometry DustTrak DRX 8533 (společnost TSI) s přímým záznamem údajů kalibrované dle ISO 12103-1, A1 test dust (tzv. Arizona Road Dust), které používají laserovou diodu a rozptyl světla pod úhlem 90°. Rozsah těchto přístrojů je od 0,001 do 150 mg/m³ a rozlišení 0,01% z naměřené hodnoty nebo 0,001mg. Přístroje simultánně měřily hmotnostní koncentrace ve 4 frakcích PM₁₀, PM₄, PM_{2,5} a PM₁. V jedné měřicí kampani (červencové) byly užity další nefelometry DustTrak 8520 (společnost TSI) nastavené na vyhodnocování PM₁₀. Tyto přístroje využívají stejný princip jako DRX, s rozsahem 0,001-100mg/m³ a rozlišením 0,01% z naměřené hodnoty nebo 0,001mg. Dle výrobce jsou oba přístroje schopny zaznamenat částice od 0,1μm.

Četnostní koncentrace byla zajištěna kondenzačním čítačem částic (CPC) P-Trak 8525 (společnost TSI), které ke kondenzaci využívají Izopropylalkohol (IPA). Tento přístroj zachytí částice od 0,02 do 1μm a jeho rozsah je po 5.10⁵ částic.cm⁻³. Přístroj vyžaduje pro přibližně 8 hodinách doplnit IPA. V našem případě byl doplňován vždy ráno před začátkem první vyučovací hodiny a pak mezi 15. a 16. hodinou téhož dne.

Hmotnostní a četnostní koncentrace PM₁ si nemusí odpovídat, protože přístroje, které měří tyto dvě koncentrace, detekují jiné velikosti. Četnostní koncentrace započítá částice přibližně od 20nm, zato pro nefelometry (měřící hmotnostní koncentrace) jsou částice pod 100nm nedetekovatelné.

Mikroklimatické podmínky (teplota, relativní vlhkost a koncentrace CO₂) byly sledovány pomocí přístrojů Telaire 7001 s dataloggerem, s přesností +/- 50 ppm (přístroje využívají čidla absorpce infračerveného světla).

Přístroje měřily v párech, jedna sada ve studované třídě a druhá na venkovním stanovišti. Integrační doba měření byla nastavena na 5 minut.

Přístroje byly uloženy poblíž sebe, tak aby se neovlivňovaly navzájem. Místa byla volena tak, aby přístroje nebyly dětmi ohroženy (možné shoení). V návaznosti na bezpečnost jak dětí, tak i přístrojů, měřící místa v učebně výtvarné výchovy (VV) a učebny biologie a chemie (B/C) neodpovídala dýchací zóně dětí. Ve VV byly přístroje instalovány na skříně cca 2m nad zemí u katedry (v čele třídy), v B/C byly přístroje

instalovány na skříni v zadní části třídy a v počítačové učebně (PU) byl přístroj umístěn v přední části učebny v dýchací zóně sedící osoby (cca 110 cm nad zemí). Nasávací otvory byly orientovány do středu třídy.

Celkem bylo během školního roku provedeno 8 čtyřdenních kampaní a jedna kampaň o prázdninách mimo výuku a to vždy jednou v měsíci od listopadu po červenec. Rozpis kampaní je prezentován v Tabulka 1.

Tabulka 1 Přehled kampaní měření

Kampaň		Dny měření	Učebna
1	listopad	7.-11.11.2011	PU
2	prosinec	5.-9.12.2011	PU
3	leden	9.-13.1.2012	VV
4	únor	20.-24.2.2012	B/C
5	březen	12.-16.3.2012	PU
6	duben	16.-20.4.2012	VV
7	květen	14.-18.5.2012	B/C
8	červen	11.6.-15.6.2012	VV
9	červenec	9.-13.7.2012	PU

Zkratky: B/C- učebna biologie a chemie; PU – počítačová učebna; VV – učebna výtvarné výchovy

Přístroje DustTrak DRX 8533 umožňují i kontrolní gravimetrické hodnocení hmotnostní koncentrace aerosolových částic v ovzduší. Po průchodu detekční celou přechází nasátý vzduch s částicemi přes koncový ("back up") filtr. K tomuto účelu byly použity membránové filtry Pallflex PTFE o průměru 37 mm s póry 2µm. Před i po

expozicí byly filtry váženy na ultracitlivých vahách Mettler Toledo MX 5 (přesnost 10^{-6} g) umístěných v mikroklimaticky ekvilibrované váhově spří teplotě $20 \pm 1^\circ\text{C}$ a relativní vlhkostí $50 \pm 5\%$. Před samotným vážením byly filtry ponechány na minimálně 24h v exsikátoru s náplní $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, která umožňuje udržet stabilní vlhkost okolo 53%. Filtry jak před expozicí, tak i po ní byly uchovávány v uzavíratelných kazetách (Petri slides). Jelikož u gravimetrického stanovení nefelometru DustTrak DRX 8533 není možno oddělit jednotlivé frakce od sebe (tak jako u optické metody), gravimetrické měření poskytuje pouze informaci o hmotnostní koncentraci všech velikostí aerosolových částic dohromady (TSP). Gravimetrické údaje tedy slouží k orientační kalibraci přístroje.

Obsazenost a ventilace v učebnách

Během kampaní byly experimentátoři přítomni pouze během instalace a doplňování IPA do P-Traku. Data o obsazenosti učeben a větrání byla získávána ve spolupráci s vyučujícími. Učitelé vyplňovali každou hodinu počet žáků, a také zda byla během hodiny otevřena okna/dveře. Rozlišení těchto proměnných je tedy po 45 min (vyučovací hodina) + 10 - 20 minut (přestávka). Jelikož data o počtu žáků nebyla vždy doplněna, byla obsazenost žáků ve třídách zpětně dopsána pomocí třídních knih. Chybějící informaci o větrání nebylo možné zpětně doplnit.

Protokol pro učitele je k nahlédnutí v Příloze A.

Ventilační rychlost

Ventilační rychlosti (VR) byly získány v průběhu kampaní, kdy žáci přítomní ve třídách zvýšili hladinu CO_2 , po opuštění a zamčení třídy, hladina klesala. Ventilační rychlost lze tedy vypočítat podle poklesu hladiny CO_2 dle rovnice:

$$VR = \frac{\frac{1}{t} \ln C_0}{C_t}$$

(Guo et al., 2008)

kde t je čas poklesu koncentrace, C_0 je počáteční koncentrace a C_t je koncentrace v čase t .

Ventilační rychlost nemohla být vypočtena během únorové kampaně pro výpadek přístroje Telaire 7001 a pro červencovou kampaň, kvůli nedostatečně vysoké hladině CO_2 , která neumožnila výpočet.

Zpracování dat

Pro analýzu vlivu vnější koncentrace na vnitřní byla data upravena na hodinový průměr, ve kterém se výrazně neprojeví okamžité nárůsty koncentrace v důsledku silného vnitřního zdroje. Tento interval se osvědčil již dříve při použití přístrojů s přímým záznamem dat (Chan *et al.*, 2002). Pro vymezení denní a noční doby byl zvolen 12 hodinový interval mezi 7. a 19. hodinou, kdy denní část pokrývá dobu přítomnosti žáků ve škole.

Rozdíly mezi hmotnostními koncentracemi PM_{10} v učebnách byly počítány z červencové kampaně, kdy žáci nebyli přítomni a nezasahovaly tedy svojí aktivitou do měření. Do této kampaně byly zahrnuty všechny třídy, přičemž v PU byl instalováno DRX a v BC a VV nefelometry DustTrak 8520, které měřily pouze jednu frakci (v tomto případě PM_{10}), proto jsou rozdíly vypočítány jen pro tuto frakci.

Sezóny byly od sebe arbitrárně rozděleny podle teplot v průběhu kampaní, a to zimní – průměrné teploty i medián blízký 5°C ; jarní/podzimní – průměrné teploty i medián blízký 10°C ; letní – průměrné teploty i medián výrazněji výše než 10°C (Tabulka 2). Jediná učebna, která byla sledována ve všech třech sezónách, byla VV.

Tabulka 2 Rozdělení kampaní do sezón podle průměrné vnější teploty [$^\circ\text{C}$] (zelená – jarní/podzimní; modrá – zimní, žlutá – letní)

	XI. 2011 (PU)	XII 2011 (PU)	I 2012 (VV)	II 2012 (BC)	III 2012 (PU)	IV 2012 (VV)	V 2012 (BC)	VI 2012 (VV)	VII 2012 (PU)
Průměr	10,1	4,9	6,2	4,6	8,8	9,6	13,7	17,8	22,5
Medián	10,4	4,6	5,7	4,5	8,9	9,2	13,8	17,6	22,7

Počet dětí v přestávkách a ventilaci nebylo možno bez přítomnosti experimentátorů zachytit. Během této periody byla použita hodnota z předcházející hodiny. Tomu se přizpůsobilo i vyhodnocování výsledků, kdy je označeno, zda hodnocená data obsahují i ta, jež byla zpětně dopsána.

Statistické zpracování dat

Ke statistickému zpracování byl použit statistický software R a pro zobrazení výsledků byl použit statistický software Statistica a MO Excel.

Pro zjištění závislosti byla použita lineární regrese, na splnění předpokladů pro lineární regresi byly užity testy Shapiro-Wilkův test normality a Breusch-Paganův test pro shodnost rozptylů. Vzhledem k tomu, že rozdělení analyzovaných hodnot nebylo normální, byl (kromě zjištění závislosti mezi hmotnostní koncentrací supermikronových částic a počtu žáků v UP, kdy data splnily podmínky pro regresi) užíván Spearmanův korelační koeficient.

Pro zjištění rozdílů mezi sezónami a třídami byl použit neparametrický Kruskal-Wallisův test. Pro porovnání dvou skupin byl užit nepárový Wilcoxonův test.

Hladina významnosti pro všechny testy byla zvolena $\alpha < 0,05$.

Výsledky

Výměna vzduchu ve třídách

Výměny vzduchu ve třídách při zavřených oknech i dveřích dosahují velmi nízkých hodnot (viz Tabulka 3). To má za následek velmi vysoké koncentrace CO_2 během vyučovacích hodin, které přesahovaly hodnotu 2000 ppm. I jiné polutanty (včetně aerosolových částic) s vnitřními zdroji tak mohou být zásluhou nízké výměny vzduchu ve třídách po jistou dobu akumulovány. Průměrně nejvyšší hodnotu výměny vzduchu měla PU.

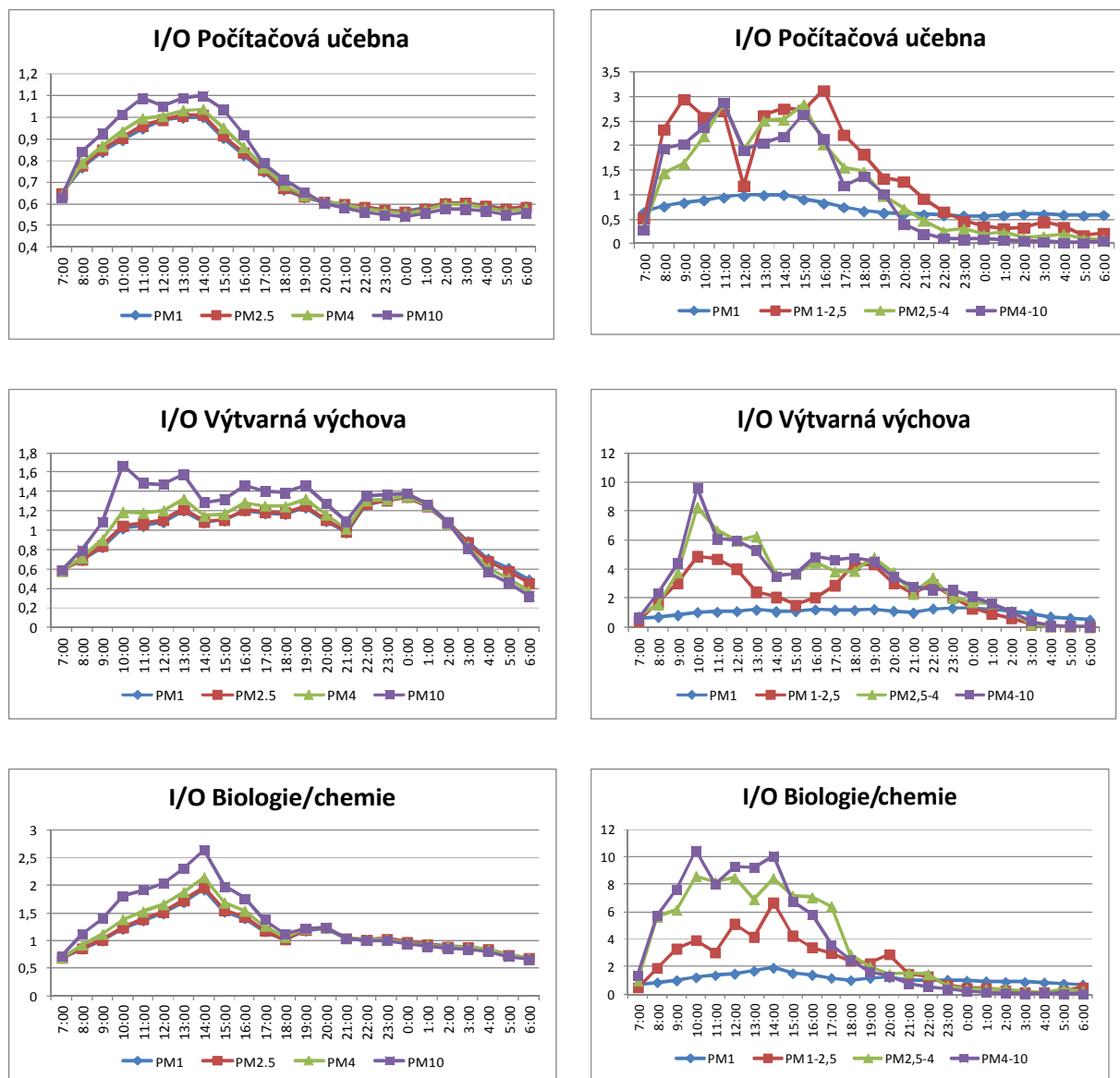
Tabulka 3 Vypočtené hodnoty výměny vzduchu ve třídách pro jednotlivé kampaně

Učebna	Kampaň	Výměna Vzduchu [h^{-1}]
PU	Listopad	0,15
	Prosinec	0,14
	Březen	0,16
VV	Leden	0,17
	Duben	0,13
	Červen	0,1
BC	Květen	0,1

Vztah vnitřní a venkovní koncentrace aerosolových částic

Během pracovních dní je v průběhu dopoledne v učebnách vyšší hodnota supermikronových aerosolových částic nežli je tomu v okolí školní budovy, což je pravděpodobně způsobené resuspencí během vyučovacích hodin. V průběhu 24 hodin jsou hodnoty poměru I/O pro submikronové částice převážně pod hodnotu 1, ačkoli v průběhu dopoledne se hodnoty poměru zvyšují až nad hodnotu 1. To je nejvíce patrné pro učebnu chemie/biologie (viz Obrázek 1). K večeru začínají poměry všech částic ve třídách klesat, jak částice sedimentují a deponují, přičemž vyššího poměru I/O nabývají submikronové částice. Během noci mají nejhrubší částice velmi nízké hodnoty I/O, protože na rozdíl od submikronových špatně penetrují do

místnosti z venkovního ovzduší. Přehled průměrných poměrů I/O pro učebny viz Obrázek 1.



I/O pro velikostní frakce PM₁, PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀ v jednotlivých učebnách

I/O pro jednotlivé PM ohraničené aerodynamickým průměrem <1; 1-2,5; 2,5-4; 4-10μm

Obrázek 1 Průměrný poměr hmotnostních koncentrací I/O pro jednotlivé učebny v průběhu pracovního dne (zpracováno ze všech kampaní)

Významná závislost hmotnostních koncentrací submikronových částic na koncentracích venkovních byla zjištěna ve všech třídách jak v průběhu dne (7:00-19:00), tak i v noci (19:00-7.00) (viz Tabulka 4). Žádná závislost mezi venkovní a vnitřní koncentrací supermikronových částic nebyla nalezena.

Tabulka 4 závislost vnitřních hmotnostních koncentrací na venkovních (tučně – statisticky významné závislosti)

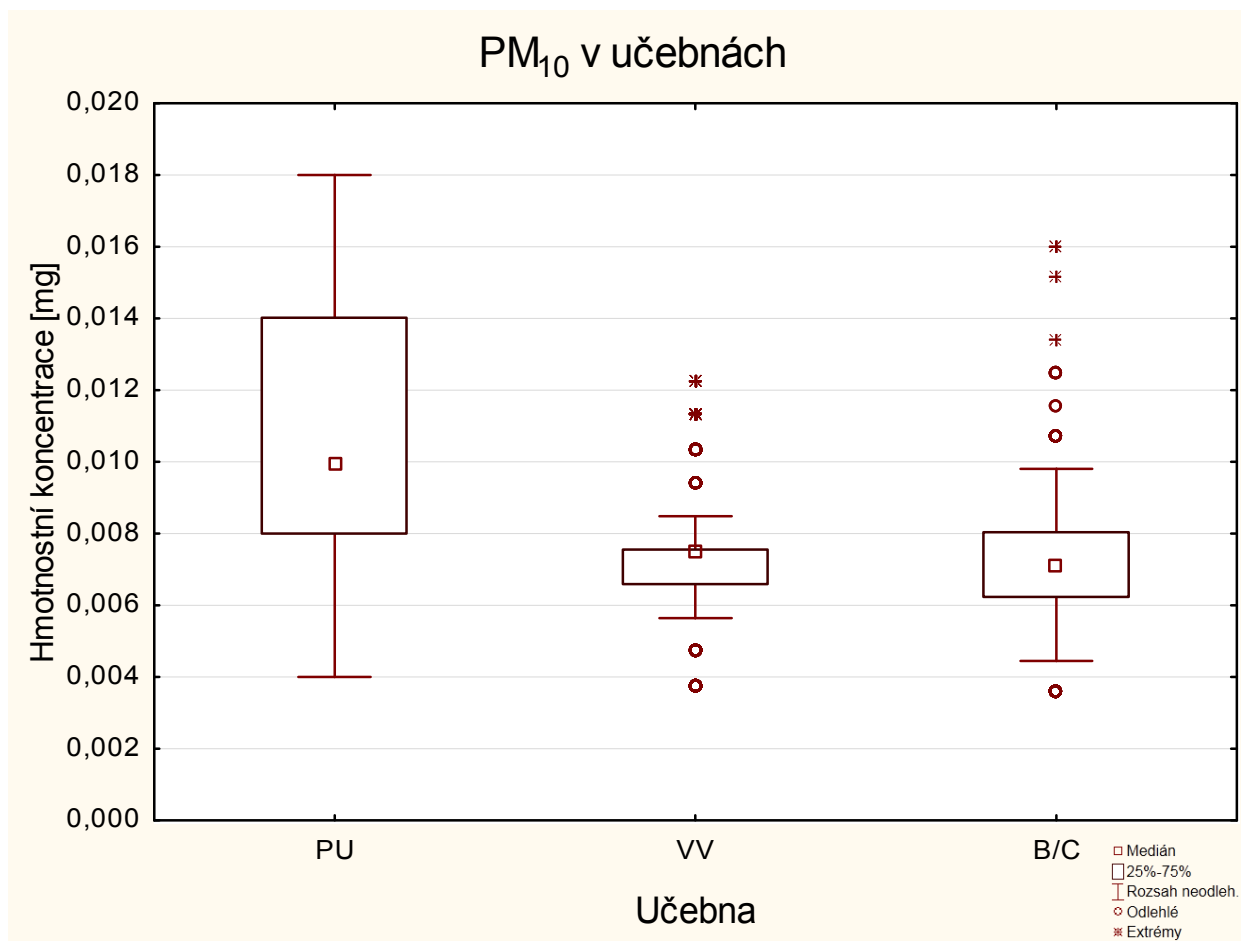
Pro B/C byla použita pouze únorová kampaň. Květnová kampaň se vyznačovala velmi vysokými vnitřními koncentracemi pravděpodobně způsobené silným vnitřním zdroji, které se nepodařilo identifikovat.

Submikronové částice						
Učebna	Den/noc	P-hodnota	Korelační koeficient	R ²	Splněna normalita dat	Splněna shodnost rozptylu
PU	den	<0,0001	0,33	0,08	ne	ano
	noc	<0,0001	0,95	0,87	ne	ne
VV	den	<0,0001	0,52	0,3	ne	ne
	noc	<0,0001	0,49	0,31	ne	ne
B/C	den	<0,0001	0,54	0,36	ano	ne
	noc	0,002	0,76	0,23	ne	ne

Supermikronové částice						
Učebna	Den/noc	P-hodnota	Korelační koeficient	R ²	Splněna normalita dat	Splněna shodnost rozptylu
PU	den	0,22	-0,1	0,01	ne	ano
	noc	0,165	0,48	0,014	ne	ano
VV	den	0,75	0,03	0,001	ne	ano
	noc	0,188	-0,15	0,014	ne	ne
B/C	den	0,887	0,002	0,0004	ne	ano
	noc	0,39	0,4	0,02	ne	ano

Vliv typu učebny a sezóny na hmotnostní koncentraci aerosolu

Během červencové kampaně, kdy děti nebyly přítomny ve škole, bylo provedeno měření ve všech třídách najednou. To dovolilo zjistit, zda existují rozdíly mezi hmotnostními koncentracemi mezi učebnami, protože venkovní podmínky byly pro všechny učebny stejné. Výrazně se lišila PU (p-hodnota $<0,001$) od dvou ostatních (VV a B/C), kde nebyl shledán rozdíl (p hodnota 0.66) (viz Obrázek 2 a Tabulka 5). Vyšší koncentrace v PU jsou výsledkem zvýšených koncentrací v nočních hodinách, které ovšem byly pozorovány jen v této třídě. Možná příčina tohoto jevu by mohla být jiná odpověď přístroje DRX na teplotu a vlhkost. To bylo vyloučeno, protože teplota ve všech třídách se udržovala po celé měření okolo 25°C a vlhkost v UP nijak nefluktovala. Navzdory stabilním venkovním koncentracím vnitřní koncentrace v PU pravidelně stoupala ve večerních hodinách. Jako možná vysvětlení se naskytují vnitřní nebo venkovní zdroj znečištění přítomný v blízkosti PU, které by byly aktivní převážně v nočních hodinách.



Obrázek 2 Hmotnostní koncentrace PM₁₀ v měřených učebnách v rámci červencové kampaně

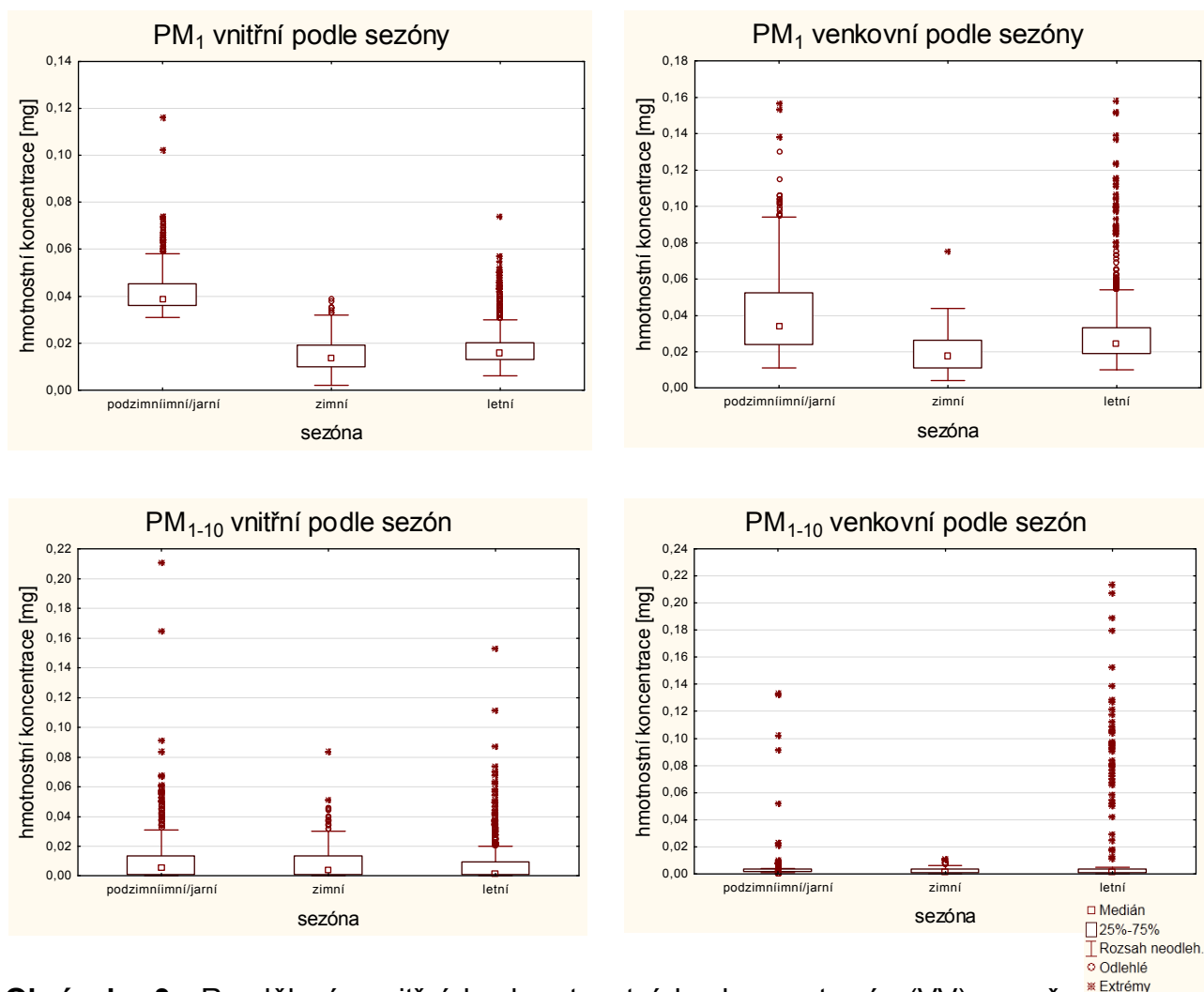
Tabulka 5 Průměry a mediány PM₁₀ v jednotlivých učebnách [mg/m³]

Učebna					
PU		VV		B/C	
Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián
0,0107	0,011	0,0071	0,0075	0,0073	0,0071

Vnitřní koncentrace submikronových částic ve VV se významně lišila v závislosti na sezóně (p -hodnota $<0,0001$). Zimní období se vyznačovalo nejnižší koncentrací částic (průměr $0,015\text{mg/m}^3$) následováno letním (průměr $0,018\text{mg/m}^3$). Podzimní/jarní období bylo charakterizováno nejvyššími hodnotami submikronových částic (průměr $0,042\text{mg/m}^3$). Tyto rozdíly jsou dány kombinací venkovních koncentrací PM₁ a zvýšené ventilace. Nejvyšší venkovní koncentrace byly zaznamenány v průběhu podzimního/jarního měření s otevřenými okny po 17% doby z kampaně, následováno letním obdobím s o něco nižší venkovní koncentrací a

otevřenými okny po 15% doby z kampaně a zimní s nejnižší venkovní koncentrací a 7%. V průběhu jarního období navíc ve vyučovacích hodinách probíhala taková aktivita, jež pravidelně zvyšovala vnitřní koncentrace nad venkovní (I/O za celé období 1,33). Vnitřní a venkovní hmotnostní koncentrace podle sezóny jsou prezentovány v Obrázek 3.

Supermikronové částice dosahovaly průměrných hodnot v podzimní/jarní sezóně $0,009\text{mg/m}^3$, v zimní $0,007\text{mg/m}^3$ a v letní $0,006\text{mg/m}^3$ (Obrázek 3 a Tabulka 6). Statisticky významný rozdíl v koncentracích byl shledán pouze pro letní a podzimní období (p-hodnota $<0,0001$). Vysoká koncentrace v podzimním/jarním období je důsledkem náhlého zvýšení hrubých částic 18.4.2012 v dopoledních hodinách v průběhu přestávky (9:40-10:10). Hrubé částice jsou výsledkem především fyzické aktivity v učebnách (resuspenze), venkovní koncentrace vliv nemá.



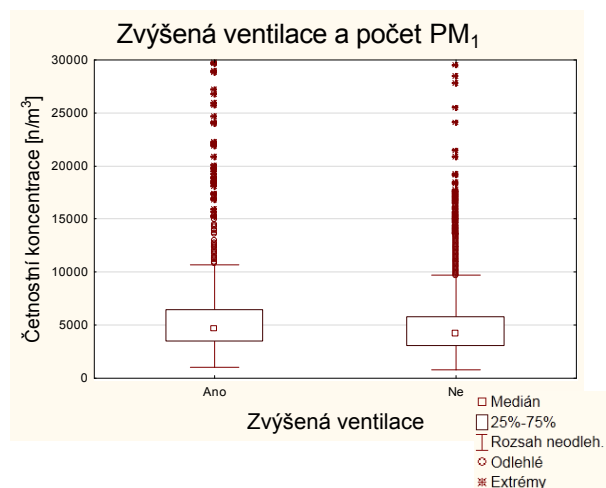
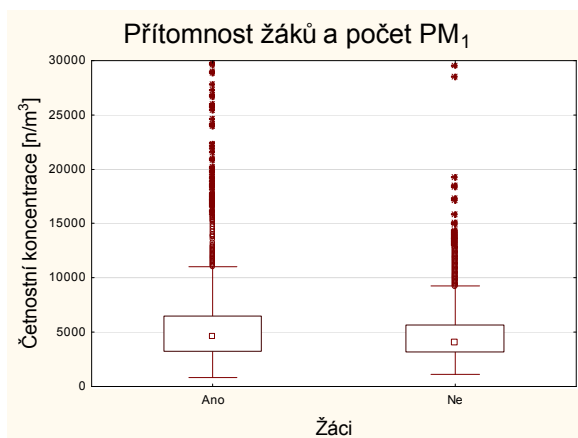
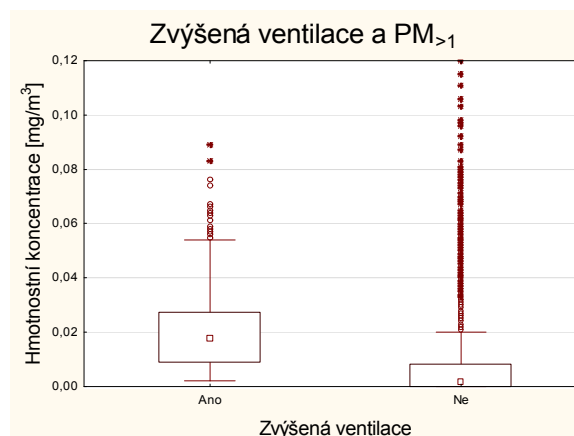
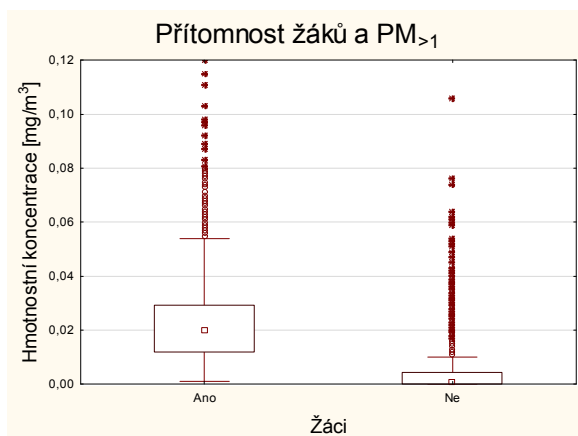
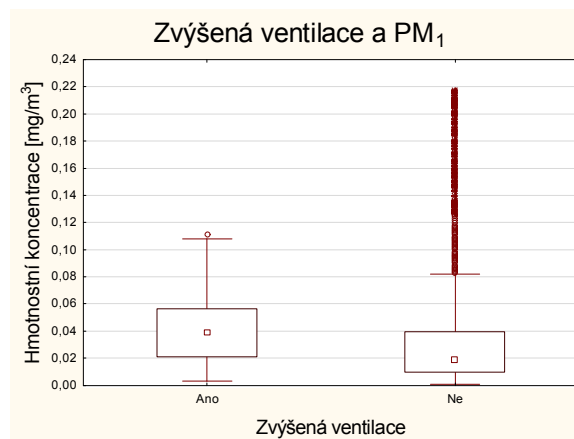
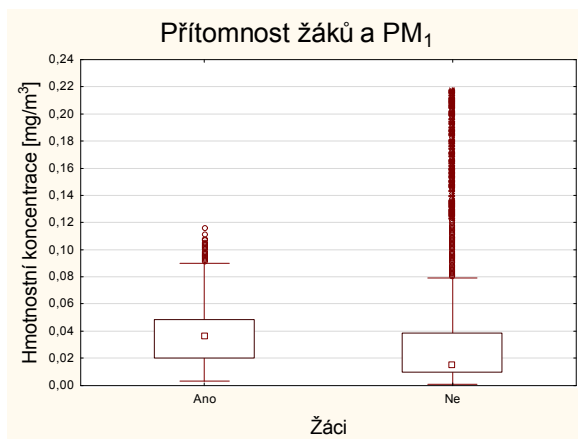
Obrázek 3 Rozdělení vnitřních hmotnostních koncentrací (VV) a časově odpovídajících venkovních hmotnostních koncentrací podle sezóny měření [mg/m³]

Tabulka 6 Průměry a mediány hmotnostních koncentrací (vnitřní VV a časově odpovídající venkovní) podle sezóny [mg/m³]

		Podzimní/jarní		Zimní		Letní	
		Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián
Hmotnostní konc. PM₁	Vnitřní	0,042	0,039	0,016	0,015	0,018	0,016
	Venkovní	0,04	0,034	0,024	0,022	0,03	0,025
Hmotnostní konc. PM_{>1}	Vnitřní	0,009	0,006	0,007	0,003	0,006	0,002
	Venkovní	0,003	0,002	0,004	0,002	0,005	0,002

Vliv přítomnosti žáků a ventilace na koncentrace aerosolu

Zvýšená ventilace (otevřené okno) a přítomnost žáků významně pozitivně ovlivňují koncentrace v učebnách a to jak v hmotnostní koncentraci supermikronových částic, tak i v hmotnostní a četnostní koncentraci submikronových částic (všechny p-hodnoty $<0,0001$) (viz Obrázek 4 a Tabulka 7). To znamená, že žáci jsou ve školách přítomni v časech s vyšší koncentrací aerosolových částic v učebnách. Tyto částice mohou vytvářet žáci sami (resuspenze supermikronových částic) nebo se studenti nacházejí ve škole v časech se zvýšenou koncentrací aerosolových částic ve venkovním ovzduší (ranní a odpolední špička automobilové dopravy), která zvyšuje koncentrace v učebnách skrze infiltraci a ventilaci (submikronové částice).

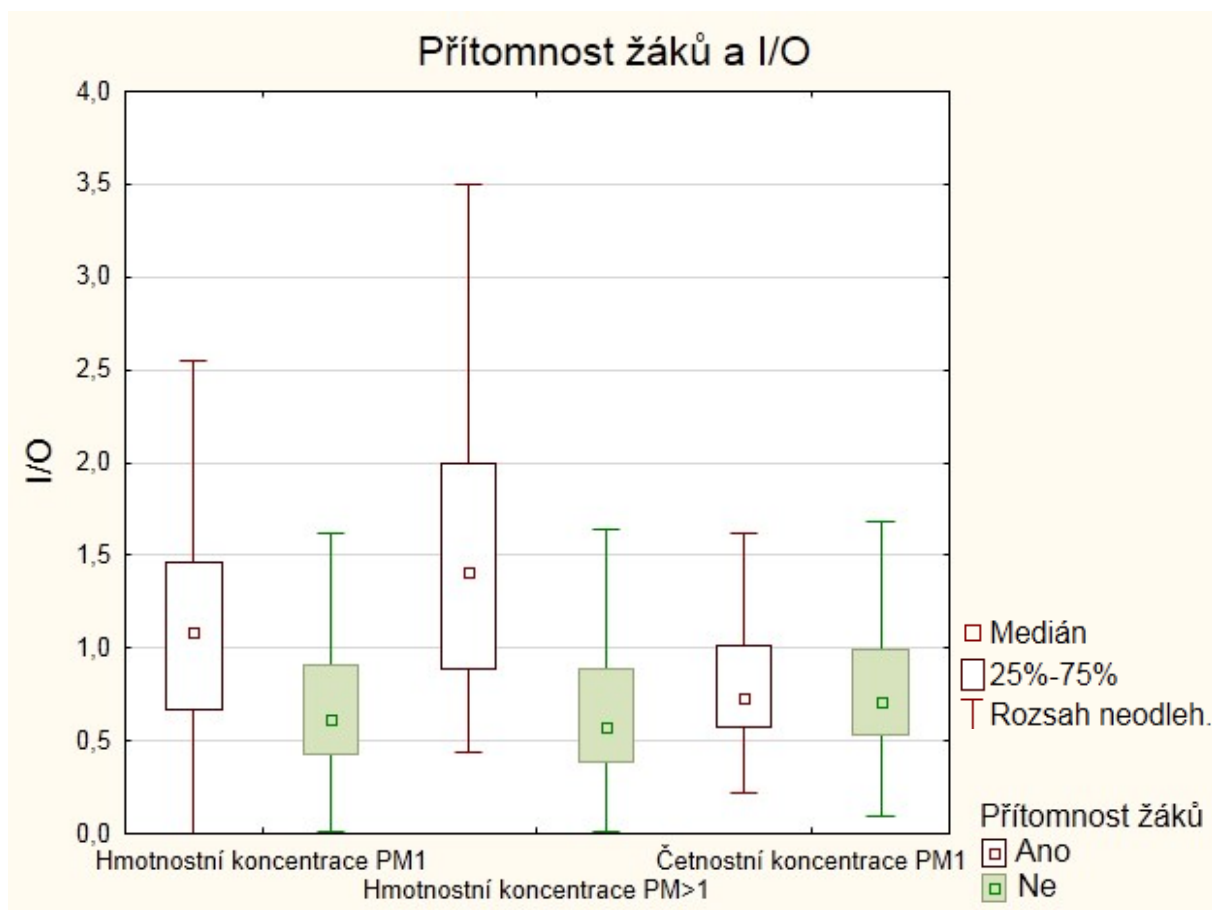


Obrázek 4 Vliv přítomnosti žáků nebo ventilace na koncentrace aerosolových částic ve třídách

Tabulka 7 Průměry a mediány hmotnostních koncentrací podle přítomnosti žáků a ventilace [mg/m³]

	Přítomnost žáků				Zvýšená ventilace			
	Ano		Ne		Ano		Ne	
	Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián
Hmotnostní konc. PM1	0,037	0,037	0,026	0,016	0,040681	0,039	0,027329	0,019
Hmotnostní konc. PM ₁₀	0,023	0,02	0,004	0,001	0,020064	0,018	0,00656	0,002
Četnostní konc. PM1	6064	4723	4779	4143	6883,41	4725	4911,038	4265,5

Pro zjištění, zda žáci jsou příčinou zvýšených koncentrací aerosolových částic, byly porovnány poměry I/O při přítomnosti žáků a za jejich nepřítomnosti, pouze v případě, kdy okna byla zavřena a data nebyla dopsána z třídních knih. Při zavřených oknech a použitím poměru I/O se sníží vliv venkovní koncentrace na výsledné hodnoty. Žáci významně zvyšovali jak poměr I/O hmotnostní koncentrace supermikronových částic (p-hodnota <0,0001) a submikronových částic (p-hodnota <0,0001), tak i poměr I/O početní koncentraci submikronových částic (p-hodnota 0,03) (viz Obrázek 5 a Tabulka 8).



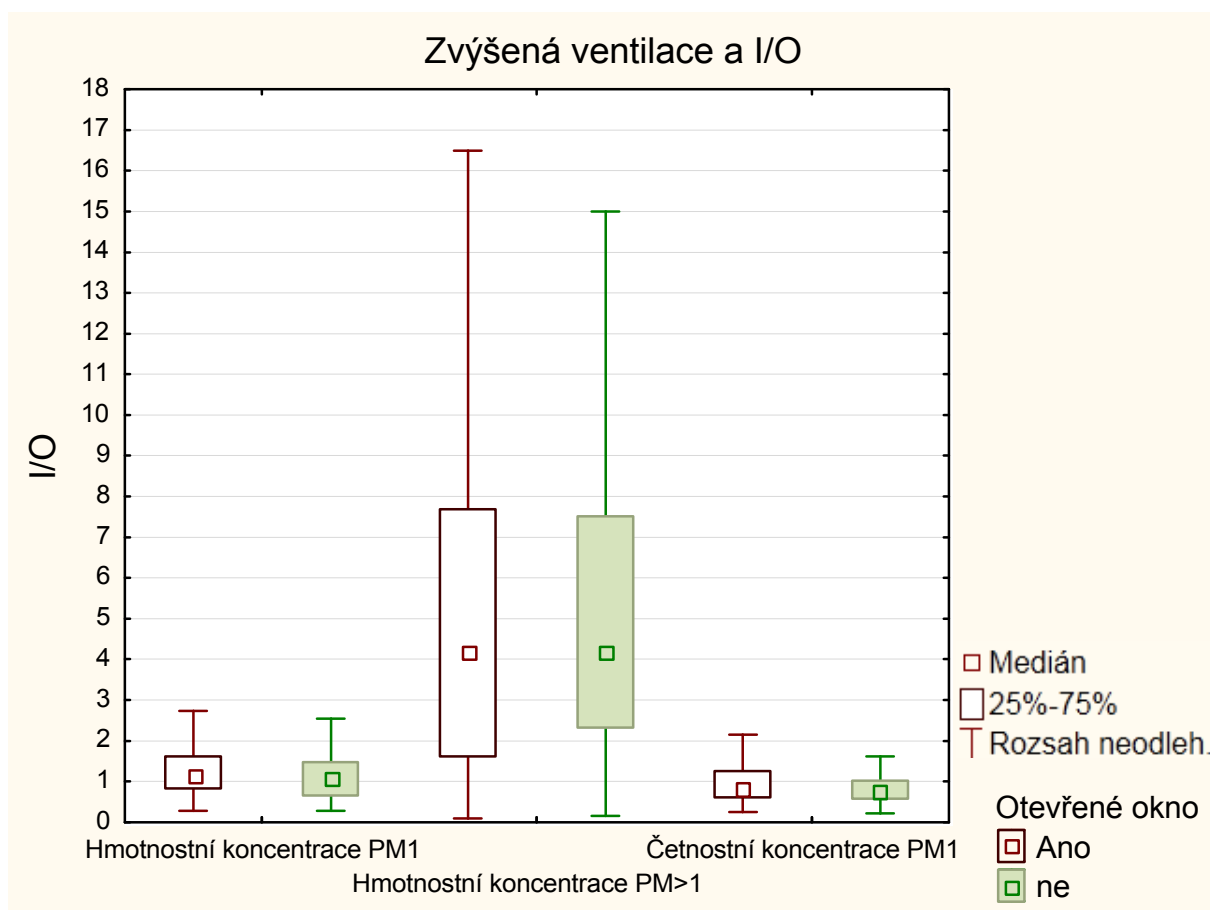
Obrázek 5 I/O v závislosti na přítomnosti žáků

Tabulka 8 Průměry a mediány poměrů I/O aerosolových částic v závislosti na přítomnosti žáků

Žáci přítomni	Průměr		Medián	
	Ano	Ne	Ano	Ne
Hmotnostní konc. PM ₁	1,2	0,93	1,1	0,61
Hmotnostní konc. PM ₁₀	1,67	0,83	1,4	0,57
Četnostní konc. PM ₁	1,07	0,88	0,73	0,73

Pouze data, pro které byl k dispozici záznam o větrání, byla použita pro další analýzu vlivu zvýšené ventilace na koncentrace aerosolových částic.

Významně vyšší poměry koncentrací I/O byly nalezeny pro četnostní a hmotnostní koncentrace submikronových částic (odpovídající p-hodnoty 0,001 a <0,0001). Pro poměry I/O hmotnostních koncentrací supermikronových částic nebyl nalezen rozdíl (p-hodnota 0,98) (viz Obrázek 6 a Tabulka 9). Tyto výsledky podporují zjištění z regresní analýzy vlivu venkovních koncentrací na vnitřní (viz Tabulka 4), a vysvětlují výsledky z předešlé analýzy, kdy byla zahrnuta všechna data (Obrázek 4). V tomto případě za zvýšené koncentrace supermikronových částic při otevřených oknech může přítomnost žáků, nikoli vliv ventilace.



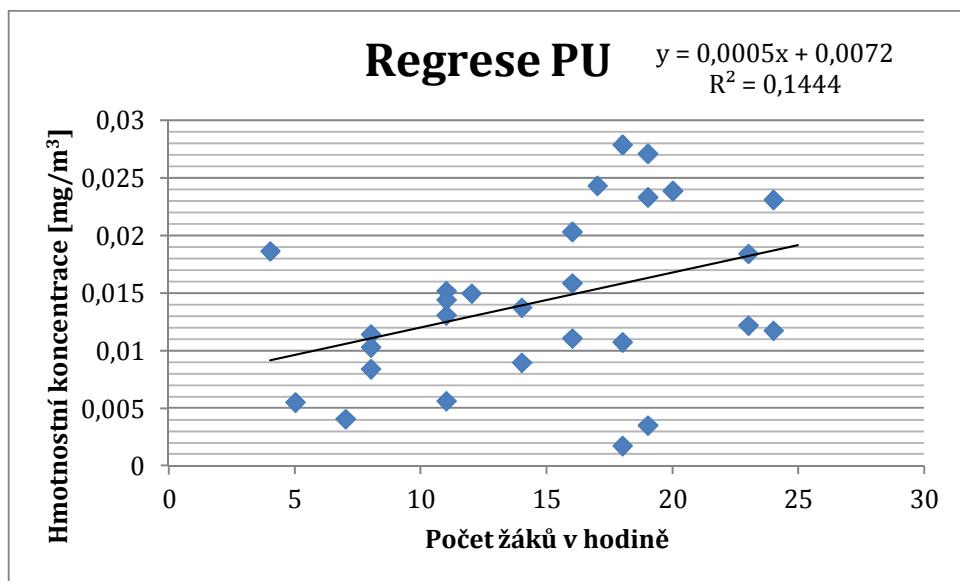
Obrázek 6 I/O v závislosti na zvýšené ventilaci (otevřené okno)

Tabulka 9 Průměry a mediány poměrů I/O aerosolových částic v závislosti na zvýšené ventilaci

Zvýšená ventilace	Průměr		Medián	
	Ano	Ne	Ano	Ne
Hmotnostní konc. PM1	1,38	1,21	1,18	1,09
Hmotnostní konc. PM _{>1}	5,58	6,08	4,2	4,2
Četnostní konc. PM1	1,57	1,07	0,8	0,73

Lineární regrese počtu žáků (pouze pro období, pro které byl k dispozici záznam o počtu přítomných žáků a pro dobu) s průměrnými hodnotami koncentrací i poměru I/O během hodiny neprokázaly žádnou závislost. Tento výsledek naznačuje, že pro koncentrace aerosolových částic bude důležitější aktivita při hodině nežli počet žáků. Vytíženost učitelů během vyučování nedovolila plné vypisování protokolů. Doplnování aktivity, která by mohla mít vliv na vnitřní ovzduší, podle zápisů v třídní knize by mohla být silně zavádějící, vzhledem k stručnému popisu vedeného v třídní knize.

Z tohoto důvodu byla provedena parciální regresní analýza pouze pro PU, kde žáci pouze pracují na počítačích, aktivita je tedy stále stejná. Významná pozitivní závislost byla objevena pouze pro počet žáků a hmotnostní koncentraci supermikronových částic (p-hodnota 0,046; korelační koeficient 0,38; předpoklady regresní analýzy byly splněny) (Obrázek 7). Z regresní rovnice lze vyčíst, že jeden žák v učebně zvýšil průměrnou hmotnostní koncentraci supermikronových částic o $0,5\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Obrázek 7 Regresní analýza počtu žáků a hmotnostní koncentrace supermikronových částic

Diskuse

Výměna vzduchu ve třídách při zavřených oknech nabývala nízkých hodnot ($0,1-0,17h^{-1}$). Odpovídající hodnota ($0,12h^{-1}$), byla také naměřena školní třídě za přirozené ventilace při zavřených oknech (Guo *et al.*, 2008). Takto nízké hodnoty výměny vzduchu ve třídách měly za důsledek vysoké hodnoty CO_2 během vyučovacích hodin. Podle standardu ASHRAE 62.1-2010 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), překročení vnitřní koncentrace CO_2 o více než 700ppm než je venkovní koncentrace značí nedostatečný ventilační systém v budově. Tato hodnota byla pravidelně překračována a koncentrace CO_2 leckdy přesahovaly 2000ppm.

Venkovní koncentrace submikronových částic významně ovlivňovaly koncentrace vnitřního prostředí školních tříd. Měly také stabilní poměr I/O, který se pohyboval kolem hodnoty 1. Tyto výsledky jsou v souladu s jinými pozorováními (Blondeau *et al.*, 2004; Poupard *et al.*, 2005; Tippayawong *et al.*, 2009). Pro zjištění závislosti byly provedeny lineární regrese, kde determinační koeficient (R^2) se může interpretovat jako procento z rozptylu, které se podařilo modelem vysvětlit. Lineární model závislosti venkovní koncentrace submikronových částic na vnitřní byl během noční doby (19:00 – 7:00) vysvětlen z 23 – 87% v závislosti na kampani. Během denní doby (7:00 – 19:00) se tato procenta snížila na 8 – 36%. Nižší procenta během denní doby naznačují, že přítomnost žáků a jejich aktivita také ovlivňovaly koncentrace submikronových částic.

Byly provedeny analýzy hmotnostních a početních koncentrací a poměru I/O hmotnostní koncentrace submikronových částic za přítomnosti žáků, které ukázaly, že za přítomnosti žáků jsou tyto koncentrace a poměr významně vyšší než při jejich nepřítomnosti. Žáci jsou tedy ve škole přítomni, když jsou koncentrace vnitřního prostředí školy zvýšené. Do vztahu mezi přítomností žáků a koncentracemi submikronových částic zasahuje ventilační rychlost, jelikož škola je výhradně přirozeně ventilovaná, tak pouze za přítomnosti žáků se ventilační rychlost mohla zvýšit a ovlivnit tak vnitřní koncentrace. Po další podrobnější analýze bylo potvrzeno, že přítomnost žáků pozitivně ovlivňuje jak poměr hmotnostní I/O, tak četností koncentrace submikronových částic i bez ovlivnění ventilační rychlosti (otevření oken). Stejná analýza byla provedena pro zvýšenou ventilaci, kde byl také nalezen

významný rozdíl mezi poměrem I/O hmotností koncentrací submikronových částic, avšak nikoli pro četností koncentrací. Tyto rozdíly si vysvětlujeme zastoupením velikostí submikronových částic. Větší submikronové částice (od 0,1 do 1 μm) přispívají významně do konečné hodnoty hmoty submikronových částic, zároveň jsou v atmosféře stabilnější a lépe penetrují. Tyto vlastnosti jim umožňují přepravu na větší vzdálenosti a spíše se projdou skrz otevřené okno do třídy společně s čerstvým vzduchem. Zato ultrajemné částice ($\text{PM}_{0,1}$) do celkové hmoty přispívají minimálně, jsou méně stabilní v atmosféře a kvůli difúzním ztrátám hůře penetrují. Nejsou v městském prostředí přenášeny na tak dlouhé vzdálenosti jako větší submikronové částice. Otevření oken přinese do třídy množství stabilnějších, větších a těžších částic, které, ale nevýznamně zvýší počet částic ve třídě. Na druhou stranu, aktivita žáků může vytvářet velké množství ultrajemných částic (Morawska *et al.*, 2009). Ultrajemné částice mají z velké části původ ve vnitřním prostředí. Je pravděpodobné, že statisticky významný rozdíl v poměru I/O počtu submikronových částic při přítomnosti žáků je výsledkem aktivity žáků během hodiny. To také podporuje zjištění, že nebyla nalezena žádná spojitost mezi hmotnostními nebo četnostními koncentracemi submikronových částic a počtem přítomných žáků v počítačové učebně, kde byla aktivita žáků stále stejná bez uvolňování významného množství VOCs do ovzduší.

Supermikronové částice měly odlišné chování než supermikronové. Vzhledem k malé schopnosti penetrovat a rychlejší depozici (především sedimentace) se supermikronové částice nedostávají ve významném množství do třídy z venkovního prostředí. Poměr I/O dosahoval během vyučujících hodin i přes hodnu 10, přičemž ty nejvyšší hodnoty měly nejhrubší frakce supermikronových částic ($\text{PM}_{2,5-10}$). Stejně poměry I/O byly pozorovány i v dalších studiích zabývajících se školním prostředím (Blondeau *et al.*, 2004; Branis *et al.*, 2005; Almeida *et al.* 2011). Koncentrace supermikronových částic nebyly významně zvýšeny při otevřených oknech ve třídách, pokud byl minimalizován vliv žáků. Naopak žáci významně zvyšovali hmotnostní koncentrace supermikronových částic, což je pravděpodobně způsobené jejich fyzickou aktivitou, která vedla k resuspenzi hrubých částic a tedy i zvýšení hmotnostní koncentrace. Ke stejným zjištěním došli Fromme *et al.* (2007), kteří se zabývali školním prostředím kdy resuspenze byla identifikována jako hlavní zdroj supermikronových částic ve školním prostředí. Stejně jako ve studii Heudorf *et al.*

(2009) byly nalezeny vysoké hmotnostní koncentrace supermikronových částic během přestávek, kdy se žáci pohybují volně po třídě.

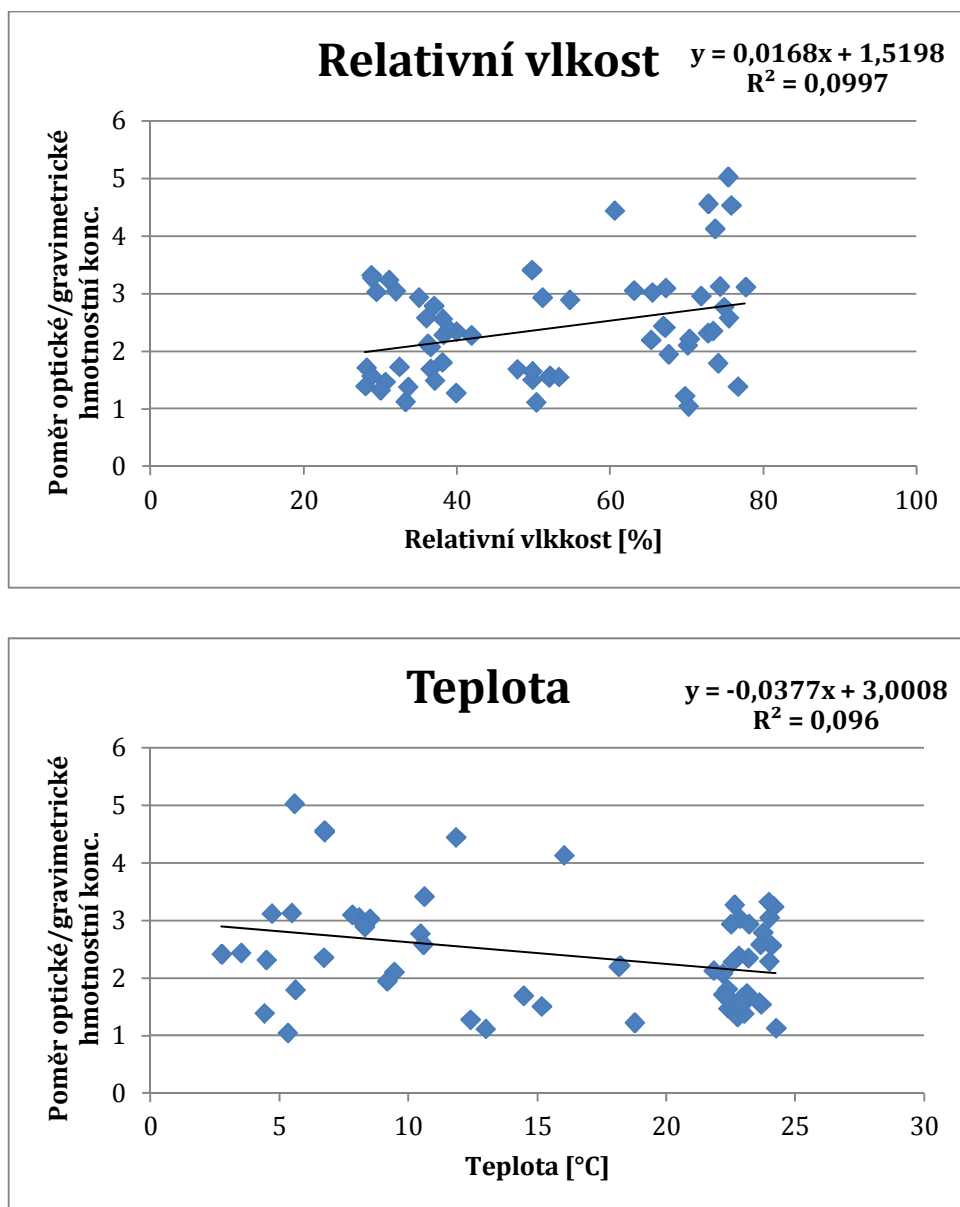
Hmotnostní koncentrace se ukázala být závislou na počtu žáků ve třídě. Průměrně jeden žák zvyšoval hmotnostní koncentraci supermikronových částic o $0,5\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Při simultánním měření ve všech třídách bez přítomnosti žáků bylo zjištěno, že mezi učebnami jsou významné rozdíly v hmotnostní koncentraci PM_{10} v průběhu 24. Významně se lišila učebna v přízemí (PU) od ostatních dvou tříd ve třetím patře. Svojí váhu by mohla mít i orientace třídy, ale nutno říci, že učebny ve třetím patře se od sebe významně nelišily, ač mají orientaci oken navzájem na opačné strany. Jako možné vysvětlení se nabízí rozdílná venkovní hmotnostní koncentrace částic během měření v blízkosti PU a třetím patře školy pravděpodobně způsobená zdrojem aktivním v nočních hodinách, nebo vnitřním zdrojem.

Vliv sezóny na koncentrace částic byl zjišťován v učebně výtvarné výchovy, která byla sledována ve všech třech sezónách (jarní/podzimní, zimní a letní). Další učebny nebyly analyzovány, ačkoli se v zimní a letní sezóně také monitorovaly všechny tři učebny. Červencová kampaň (PU) by mohla mít značně podhodnocené koncentrace z důvodu nepřítomnosti žáků a v průběhu květnové kampaně byl v BC přítomen významný zdroj aerosolových částic, data by mohla být naopak značně nadhodnocená. Z analýzy vyplynulo, že nejvyšších koncentrací bylo dosaženo v jarním/podzimním období, zimní období vykazovalo nejnižší koncentrace. To je v rozporu s jinými sledováními (Diapouli *et al.*, 2007; Fromme *et al.*, 2007; Branis *et al.*, 2009), kdy zimní období mělo za následek vyšší koncentrace aerosolových částic ve vnitřním prostředí třídy. To si vysvětlujeme tím, že v zimním období jsou obecně vyšší koncentrace venkovních aerosolových částic než v letním či jarním. Naše měření se odehrálo za podmínek neodpovídajících tomuto předpokladu, kdy zimní období se vyznačovalo nejnižší venkovní koncentrací. Z toho vyplývá, že sezóna měření nebyla rozhodující, ale příčinou rozdílů mezi sezónami byla ve skutečnosti venkovní koncentrace.

Při použití nefelometrů za jiných podmínek než, pro které byly kalibrovány, s sebou přináší jistá úskalí, nadhodnocují skutečnou hmotnostní koncentraci částic (Branis *et al.*, 2010; Borgini *et al.*, 2011). DRX přístroje umožňují gravimetrické

stanovení průměrné koncentrace TSP, jelikož jsou vybaveny filtrem, kde se opticky změřené částice zachytí. Opticky a gravimetricky změřené hmotnostní koncentrace TSP byly dány do poměru. Poměry byly analyzovány pomocí lineární regrese, kde se sledovala závislost na vlhkosti a teplotě (viz Obrázek 8). Z analýzy vyplývá, že nefelometry přeměřují více se snižující teplotou a zvyšující relativní vlhkostí.



Obrázek 8 Závislosti poměru gravimetricky stanovené/opticky stanovené hmotnostní koncentraci na relativní vlhkosti a teplotě prostředí pro všechna měření

Hodnoty poměru opticky a gravimetricky naměřených koncentrací jsou odpovídající pouze pro TSP, protože částice používané v ISO 12103-1, A1 testu (přístroje kalibrovány) jsou bližší právě TSP nežli jemným městským částicím. Tento vztah by se tedy neměl přiřazovat jednotlivým frakcím městského aerosolu.

V průběhu každé kampaně byly průměrné venkovní teploty nižší než vnitřní teploty. Průměrná vlhkost naopak byla při každé kampani venku vyšší (viz Tabulka 10). Nadhodnoceny tedy byly spíše venkovní hmotnostní koncentrace nežli ty vnitřní.

Tabulka 10 Vnitřní (I) a venkovní (O) průměrné teploty (T) a relativní vlhkosti (RH) pro každou kampaň

	XI. 2011		XII 2011		I. 2012		II. 2012		III. 2012	
	O	I	O	I	O	I	O	I	O	I
RH [%]	73,2	37,5	72,9	29,7	74	37	71,8	30,5	66,5	31,2
T [°C]	10,1	23,9	4,9	22,6	6,2	22,4	4,6	22,9	8,8	24,1

	IV. 2012		V. 2012		VI. 2012		VII. 2012	
	O	I	O	I	O	I	O	I
RH [%]	58	32,5	46,9	39,2	69,7	51,8	51,1	47,3
T [°C]	9,6	23,1	13,7	22,6	17,8	23,3	22,5	24,9

Závěr

Předkládaná práce si kladla za cíl zjistit ovlivňování jak hmotnostních koncentrací frakcí aerosolových částic, tak i početní koncentrace submikronových částic venkovními koncentracemi, prezencí žáků ve třídě a ventilací v oborových třídách základní školy. Potvrdila úzký vztah mezi hmotnostní koncentrací submikronových částic venkovními a vnitřními, kdy se při otevřených oknech tato koncentrace významně zvýší. To však neplatilo pro početní koncentraci té samé frakce, naznačující, že infiltrované submikronové částice budou mít větší rozměry, které se projeví celkově větší hmotou. Početní koncentrace však významně zvyšovala přítomnost žáků. To naznačuje, že žáci a jejich aktivity produkují i částice nejjemnějších frakcí, což se může projevit výrazněji na četnostní koncentraci, ale nikoli (nebo jen v omezené míře), na hmotnostní koncentraci. Analýzou pouze počítačové učebny, kde je aktivita žáků výrazně omezena na práci s počítačem, nebyla nalezena závislost mezi počtem žáků přítomných ve třídě a početní koncentrací submikronových částic. To naznačuje, že nalezená vyšší koncentrace počtu submikronových částic nebyla výsledkem pouhé přítomnosti žáků, ale jejich aktivit, které jsou v dalších sledovaných učebnách (výtvarná výchova a biologie/chemie) různorodé a časté.

Vyšší hmotnostní koncentrace hrubých částic byly pravděpodobně zapříčiněny fyzickou aktivitou žáků, která způsobila resuspenzi těchto částic do ovzduší, jak již bylo v dřívějších studiích pozorováno.

Práce naznačila další možný směr výzkumu, který by měl identifikovat činnosti, při kterých dochází k tvorbě nových submikronových částic během vyučovacích hodin.

Zdroje

Almeida, S. M., Canha, N., Silva, A., Freitas, M. C., Pegas, P., Alves, C., Evtyugina, M. et Pio, C. A. (2011), „Children exposure to atmospheric particles in indoor of Lisbon primary schools.“, *Atmospheric Environment*, Vol. 45, No. 40, p. 7594–7599.

Ashmore, M. R. et Dimitroulopoulou, C. (2009), „Personal exposure of children to air pollution.“, *Atmospheric Environment*, Vol. 43, No. 1, p. 128 – 141.

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) (2010), “ASHRAE standard 62.1-2010: Ventilation for acceptable indoor air quality”, available at: http://openpub.realread.com/rserver/browser?title=/ASHRAE_1/ashrae_62_1_2010_1024 (accessed 19/8/2012).

Aurangojeb, M. (2011), „Relationship between PM10, NO2 and particle number concentration: validity of air quality controls.“, *Procedia – Environmental Sciences*, Vol. 6, p. 60 – 69.

Avigo, D. Jr, Godoi, A. F., Janissek, P. R., Makarovska, Y., Krata, A., Potgieter-Vermaak, S., Alföldy, B., Van Grieken, R. et Godoi R. H. (2008), „Particulate matter analysis at elementary schools in Curitiba, Brazil.“ *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, Vol. 391, No. 4, p. 1459–1468.

Blondeau, P., Iordache, V., Poupard, O., Genin, D. et Allard, F. (2004), „Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools.“, *Indoor Air*, Vol. 15, No. 1, p. 2–12.

Borgini, A., Tittarelli, A., Ricci, C., Bertoldi, M., De Saeger, E. et Crosignani, P. (2011), “Personal exposure to PM2.5 among high-school students in Milan and background measurements: the EuroLifeNet study.”, *Atmospheric Environment*, Vol. 45, No. 25, p. 4147–4151.

Branis, M. et Kolomaznikova, J. (2010), “Year-long continuous personal exposure to PM_{2.5} recorded by a fast responding portable nephelometer.”, *Atmospheric Environment*, Vol. 44, No. 24., p. 2865–2872.

Branis, M., Rezacova, P. et Domasova, M. (2005), „The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ in a classroom.“, *Environmental Research*, Vol. 99, No. 2, p. 143–149.

Branis, M., Safranek, J. et Hytychová, A. (2009), „Exposure of children to airborne particulate matter of different size fractions during indoor physical education at school.“, *Building and Environment*, Vol. 44, No. 6, p. 1246–1252.

Burdack-Freitag, A., Rampf, R., Mayer, F. et Breuer K. (2009), „Identification of anthropogenic volatile organic compounds correlating with bad indoor air quality“ll, in: *In Healthy Buildings: Proceedings of the 9th International Healthy Buildings Conference and Exhibition*. Eds.: Santanam, S., Bogucz, E.A., Peters, C., and Benson, T., Healthy Buildings 2009, Syracuse, NY, USA. Paper No.:645.

Chan, A. T. (2002), „Indoor-outdoor relationships of particulate matter and nitrogen oxides under different outdoor meteorological conditions.“, *Atmospheric Environment*, Vol. 36, No. 9, p. 1543–1551.

Crist, K., Liu, B., Kim, M., Deshpande, S. et John, K. (2008), „Characterization of fine particulate matter in Ohio: Indoor, outdoor, and personal exposures.“, *Environmental Research*, Vol. 106, No. 1, p. 62 – 71.

Diapouli, E., Chaloulakou, A. et Spyrellis, N. (2007), „Levels of ultrafine particles in different microenvironments – Implication to children exposure.“, *Science of the Total Environment*, Vol. 388, No. 1-3, p. 128 – 136.

Diapouli, E., Chaloulakou, A., Mihalopoulos, N. et Spyrellis, N. (2008), „Indoor and outdoor PM mass and number concentrations at schools in the Athens area.“, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 136, No. 1-3, p. 13 – 20.

Ferro, A. R., Kopperud, R. J. et Hildemann, L. M. (2004), „Source strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter.“, *Environmental Science & Technology*, Vol. 38, No. 6, p. 1759–64.

Fromme, H., Diemer, J., Ditrich, S., Kyrus, J., Heinrich, J., Lang, W., Kiranoglu, M. et Twardella, D. (2008), „Chemical and morphological properties of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) in school classrooms and outdoor air.“, *Atmospheric Environment*, Vol. 42, No. 27, p. 6597–6605.

Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B. et Ruden, H. (2007), „Particulate matter in the indoor air of classrooms—exploratory results from Munich and surrounding area.“, *Atmospheric Environment*, Vol. 41, No. 4, p. 854–866.

Guo, H., Morawska, L., He, C., et Gilbert, D. (2008) „Impact of ventilation scenario on air exchange rates and on indoor particle number concentrations in an air-conditioned classroom.“, *Atmospheric Environment*, Vol. 42, No. 4, p. 757–768.

Heudorf, U., Neitzert, V. et Spark, J. (2009), „Particulate matter and carbon dioxide in classrooms - the impact of cleaning and ventilation.“, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 212, No. 1, p. 45 – 55.

Hoppe, P et Martinac, I. (1998), “Indoor climate and air quality: Review of current and future topics in the field of ISB study group 10.”, *International Journal of Biometeorology*, Vol. 42, No. 1, p. 1 – 7.

Mendell, M. J. et Heath, G. A. (2005), „Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature.“, *Indoor Air*, Vol. 15, No. , p. 27–52.

Morawska, L., He, C., Johnson, G., Guo, H., Uhde, E. et Ayoko, G. (2009), “Ultrafine Particles in Indoor Air of a School: Possible Role of Secondary Organic Aerosols.”, *Environmental Science and Technology*, Vol. 43, No. 24, p. 9103–9109.

Ould-Dada, Z. et Baghini, N. M. (2001), „Resuspension of small particles from tree surfaces.“, *Atmospheric Environment*, Vol. 35, No. 22, p. 3799–3809.

Paevere, P. et Brown, S. (2009) „The impact of indoor environment quality on occupant health, wellbeing and productivity in a sustainable office building.“, in: In Healthy Buildings: Proceedings of the 9th International Healthy Buildings Conference and Exhibition. Eds.: Santanam, S., Bogucz, E.A., Peters, C., and Benson, T., Healthy Buildings 2009, Syracuse, NY, USA. Paper No.: 450.

Poupard, O., Blondelu, P., Iordache, V et Allard, E. (2005), „Statistical analysis of parameters influencing the relationship between outdoor and indoor air quality in schools.“, *Atmospheric Environment*, Vol. 39, No. 11, p. 2071–2080.

Shaughnessy, R. et Vu, H. (2012), „Particle loadings and resuspension related to floor coverings in chamber and in occupied school environments.“, *Atmospheric Environment*, Vol. 55, No. 0, p. 515–524.

Silvers, A., Florence, B. T., Rourke, D. L. et Lorimor, R. J. (1994), „How children spend their time—a sample survey for use in exposure and risk assessment.“ *Risk Analysis*, Vol. 14., No. 6, p. 931–944.

Sousa S. I. V., Alvim-Ferraz M. C. M. et Martins F. G. (2012), „Indoor PM10 and PM2.5 at Nurseries and Primary Schools.“, *Advanced Materials Research*, Vol. 433–440, p. 385-390.

Thatcher, T. L. et Layton, D. W. (1995), „Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence.“, *Atmospheric Environment*, Vol. 29, No. 13, p. 1487–1497.

Tippayawong, N., Khuntong, P., Nitatwichit, C., Khunatorn, Y. et Tantakitt, C. (2009), „Indoor/outdoor relationships of size-resolved particle concentrations in naturally ventilated school environments“, *Building and Environment*, Vol. 44, No. 1, p. 188–197.

TSK Praha (Technická správa komunikací) (2012), „Intenzity dopravy“, Online: http://www.tsk-praha.cz/wps/portal/doprava/web/pro-odborniky/intenzity-dopravy!/ut/p/c5/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLP1OnAG93QwMDd0tXA09HZyNfc0cDIwtXE6B8JLK8l68BSD7YK9DLxdDA3ZyA7nCQfThVuBsao8tjmg-SN8ABHA30_Tzyc1P1C3ljDDID0hUB-62rRA!!/dl3/d3/L2dJQSEvUUt3QS9ZQnZ3LzZfNENQQzICMUEwOFREMjBJQVUyNkVDSjMwNTE!/ (accessed 4.8.2012).

WHO (Světová zdravotnická organizace) (2011), „Air quality and health“, online: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/> (accessed 17.7.2012).

Zhang, Q et Zhu, Y., 2012, „Characterizing ultrafine particles and other air pollutants at five schools in South Texas.“, *Indoor Air*, Vol. 22, No. 1, p. 33-42.

Příloha A

Protokol, který měli učitelé k dispozici ve třídách, ve kterých probíhalo měření.

Protokol byl přichycen na viditelném místě na katedře. Z druhé strany byly předtištěny linky na možné připomínky a postřehy během vyučovací hodiny.

VÝZKUM VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ VE TŘÍDÁCH ZŠ KLADSKÁ

Vážení pedagogové,

Během tohoto školního roku probíhá v ZŠ Kladská výzkum vnitřního prostředí pod záštitou Ústavu pro životní prostředí, Univerzita Karlova. Při této příležitosti bychom Vás chtěli požádat o spolupráci. Kromě počtu žáků a počtu otevřených oken během výuky, bychom rádi věděli, zda během výuky probíhaly aktivity, které by mohly mít vliv na vnitřní prostředí (ovzduší, teplota, vlhkost) jako jsou např. chemické experimenty, fyzická aktivita žáků (hry), kreslení se suchými křídami a další.

Informace, které nám poskytnete, jsou zásadní pro správnou interpretaci naměřených dat. Vážíme si všech údajů, postřehů a připomínek, které nám sdělíte, a proto všimnete-li si něčeho, o čem soudíte, že bychom měli vědět, využijte prosím zadní stranu tohoto papíru.

Omlouváme se za hluk, které naše přístroje vydávají, a doufáme, že nebudou narušovat plynulý chod výuky.

Děkujeme za spolupráci

Prof. RNDr. Martin Braniš CSc.

Jirka Hromádka a Jitka Štolcpartová

Učebna	Datum	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		7:05- 7:50	8:00- 8:45	8:55- 9:40	10:10-10:55	11:05-11:50	12:00-12:45	12:55-13:40	13:50-14:35	14:45-15:30	15:40-16:25
počet žáků											
větrání (otevřená okna)											
aktivita											

